



耦合微通道与相变材料的太阳能光伏/热系统实验研究

陈梦汝¹, 林文野², 黄超², 宋文吉², 郑瑞芸¹, 顾晓滨³, 崔兴兰^{4,5}, 年洪恩³

(¹广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006; ²中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640; ³中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008; ⁴有研资源环境技术研究院(北京)有限公司无污染有色金属提取及节能技术国家工程研究中心, 北京 100088; ⁵北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 太阳能可再生能源的开发利用被认为是缓解全球能源危机与环境压力的重要途径。然而, 传统太阳能利用系统仍面临多重技术瓶颈, 如光伏光电转换效率受其温度影响、系统综合能效偏低、能量产需时空失配等。因此, 本研究提出一种耦合多层微通道与定形相变材料的温控-蓄热一体式光伏/热系统。通过搭建实验测试平台, 对比分析了光伏系统、常规光伏-相变材料系统及新型耦合系统的热电性能, 并重点探讨了太阳辐照度、工质流量、相变材料质量等关键参数对系统运行特性的影响规律。实验结果表明, 该温控-蓄热一体式光伏/热系统展现出优异的综合性能。在1000 W/m²太阳辐照度下, 光伏电池最高工作温度可以控制在55.3℃以内, 系统平均电效率和平均热效率分别达到12.8%和24.7%。通过实验对比可知, 常规光伏系统和光伏-相变材料复合系统的整体效率分别为29.2%和46.2%, 而本系统的最高整体效率可达58.3%。进一步分析发现, 随着太阳辐照度的增加, 系统电效率、热效率及整体效率呈下降趋势, 但最大输出功率持续提升。此外, 提高微通道内工质流量以及增加相变材料的装载质量, 可显著降低光伏组件工作温度, 并增强系统的电效率与热效率。另一方面, 在无太阳辐照条件下, 该系统能够有效延缓相变材料的冷却凝固过程。与常规光伏/热系统相比, 储热单元保温时间从78 min可以延长至154 min。

关键词: 光伏/热系统; 多层微通道; 相变材料; 热能存储; 热管理

doi: 10.19799/j.cnki.2095-4239.2026.0101

中图分类号: TK 519

文献标志码: A

文章编号: 2095-4239 (2026) 03-747-13

Integrated design and experimental study of photovoltaic/thermal system based on microchannels and phase change materials

CHEN Mengru¹, LIN Wenye², HUANG Chao², SONG Wenji², ZHENG Ruiyun¹, GU Xiaobin³,
CUI Xinglan^{4,5}, NIAN Hongen³

(¹School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, Guangdong, China; ²Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, Guangdong, China; ³Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, Qinghai, China; ⁴National Engineering Research Center of Clean Extraction and Energy-saving Technologies

收稿日期: 2026-01-31; 修改稿日期: 2026-02-28。

基金项目: 北京市自然科学基金-怀柔创新联合基金项目 (L245004); 中国科学院国际合作局对外合作重点资助项目 (041GJHZ2024027MI); 广东省科技计划项目资助 (2025A0505020072); 广东省项目 (2023QN10L241); 中国科学院“一带一路”国际科学组织联盟访问学者计划 (CAS-ANSO-FS-2024-23)。

第一作者: 陈梦汝 (2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为太阳能光伏光热技术, E-mail: luckyarrrr@163.com; 通信作者: 黄超, 博士后, 研究方向为太阳能综合利用系统和微纳尺度传热, E-mail: huangchao1@ms.giec.ac.cn。

引用本文: 陈梦汝, 林文野, 黄超, 等. 耦合微通道与相变材料的太阳能光伏/热系统实验研究[J]. 储能科学与技术, 2026, 15(3): 747-759.

Citation: CHEN Mengru, LIN Wenye, HUANG Chao, et al. Integrated design and experimental study of photovoltaic/thermal system based on microchannels and phase change materials[J]. Energy Storage Science and Technology, 2026, 15(3): 747-759.

for Non-ferrous Metals, GRINM Resources and Environment Tech. Co., Ltd., Beijing 100088, China; ⁵School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: The development and utilization of solar energy, a clean resource, is regarded as a crucial approach to alleviate the global energy crisis and environmental pressure. However, traditional solar energy utilization systems still face multiple technical bottlenecks, such as the photoelectric conversion efficiency being affected by temperature, low comprehensive energy efficiency of the system, and the temporal and spatial mismatch between energy supply and demand. Therefore, this paper proposes an integrated temperature control and heat storage photovoltaic/thermal system combining multi-layer microchannels and shaped phase change materials. An experimental test platform was constructed to compare and analyze the thermoelectric performance of a conventional PV system, a PV-PCM hybrid system, and the novel integrated system proposed in this study. The effects of key parameters, including solar irradiance, working fluid flow rate, and PCM mass, on the operational characteristics of the system were emphatically investigated. The experimental results demonstrate that the integrated temperature control and heat storage PV/T system exhibits excellent comprehensive performance. At a solar irradiance of 1000 W/m^2 , the maximum operating temperature of the PV cells can be controlled within 55.3°C , and the electrical and thermal efficiencies of the system reach 12.8% and 24.7%, respectively. Compared with the conventional PV system and the PV-PCM hybrid system, the overall efficiency of the proposed system is increased by 29.2% and 46.2%, respectively, with a maximum value of 58.3%. Further analysis reveals that with the increase in solar irradiance, the electrical efficiency, thermal efficiency, and overall efficiency of the system show a downward trend, while the maximum output power continues to rise. In addition, increasing the working fluid flow rate in the microchannels and the loading mass of PCM can significantly reduce the operating temperature of the PV module and enhance the electrical and thermal efficiencies of the system. On the other hand, under non-solar irradiance conditions, the system can effectively delay the cooling and solidification process of the PCM. Compared with the traditional PV/T system, the thermal retention time of the heat storage unit is extended from 78 min to 154 min.

Keywords: photovoltaic/thermal system; multi-layer microchannel; phase change material; thermal energy storage; thermal management

传统化石燃料的大规模消耗加剧了全球能源危机与环境污染,而可再生能源因近乎无限的供应潜力和低碳环保特性,被认为是应对上述挑战的关键途径之一^[1]。在众多可再生能源形式中,太阳能凭借其分布广泛、储量丰富等优势,近年来受到各界的广泛研究^[2-4]。目前,太阳能的利用方式主要包括光伏发电(photovoltaic, PV)技术和光热利用(photothermal, PT)技术^[5]。其中,太阳能PV系统虽然具有部署灵活、运维成本低等特点,但光伏组件仅能将特定波段的太阳辐射转化为电能,其余能量以热的形式积累,导致组件温度升高和电性能衰

减^[6-7]。研究证实,光伏板温度每上升 1°C ,其光电转换效率将下降 $0.4\%\sim 0.5\%$ ^[8]。与此同时,传统光热利用技术仍存在建设成本高、系统能效偏低及热损失严重等瓶颈,制约了相关技术的进一步发展^[9]。为此,研究人员提出太阳能光伏/光热技术(photo-voltaic/thermal, PV/T),通过耦合光伏组件与集热器,实现电能与热能的协同高效输出,有效克服了单一系统在能量利用形式及收集效率方面的局限性,显著提升系统的整体能效^[10-11]。

截至目前,PV/T系统已展现出巨大的开发潜力,并在相关领域得到推广应用。然而,如何进一

步协同优化系统的光电转换与光热转换性能,仍是当前研究的难点之一。相变材料(phase change material, PCM)因具备较高的储热密度及近乎恒定的相变温度,被认为是实现光伏组件温度调控与系统热能储存的有效途径,引起了国内外学者的广泛关注^[12-13]。在光伏热管理方面,研究人员将相变材料集成于光伏板背部,利用相变材料在相变过程中的大容量吸热特性,直接消纳电池光电转换产生的废热,从而降低其工作温度并提升光电转换效率^[14-15]。Huang^[16]在建筑集成光伏系统中引入双层相变材料结构并进行了实验研究。结果表明,复合系统中光伏电池的工作温度可以稳定控制在25℃附近。Malvi等^[17]的仿真研究表明,将相变材料与光伏板组合,可有效降低光伏电池温度,使电效率提升9%。Luo等^[18]通过全年动态仿真研究发现,集成相变材料的太阳能PV系统展现出优异的温度调控性能。他们的模拟结果表明,光伏电池的峰值温度由79.72℃降至57.39℃,年平均电效率提升10.15%。然而,此类研究中相变材料的功能多聚焦于光伏组件的被动热管理,未能实现对所吸收热能的有效提取与利用。这不仅造成了显著的能量冗余与浪费,也限制了系统整体能效的进一步提升。

为实现对相变材料中储存热能的高效利用,另一种常见的研究是将相变介质作为储热单元集成到PV/T系统中^[19-21]。Modjinou等^[22]通过对比实验发现,引入封装式相变材料单元的太阳能利用系统,其日均热效率和电效率分别为28.76%和7.95%,综合效率为36.71%,显著优于传统热管型PV/T系统。Hosseinzadeh等^[23]将石蜡相变材料介质包裹于PV/T系统集热器管道周围,实验测量发现该配置下的光伏热效率提升至51.66%。此外,Fu等^[24]通过实验测量和数值模拟研究了集成相变材料的PV/T系统的热电性能。研究发现,使用相变材料时,系统电效率和热效率分别上升约1%和24.3%。然而,尽管集成相变材料能有效提升系统的能量利用率,但受限于相变介质较低的本征热导率,内部热阻较大,局部热量难以迅速扩散,使得光伏组件表面的温场均匀化调控仍面临严峻挑战。同时,储热单元在无光照的夜间缺乏有效的保温措施,导致热能易散失到环境中,大幅削弱了系统的热能利用时效与跨时段供能潜力。

针对上述问题,本研究结合多层微通道与定形

复合相变材料,构建了一种新型温控-蓄热一体化PV/T系统。本系统可通过微通道内工质的灵活切换,实现通水时快速换热,将光伏废热传递至相变材料层完成高效储热与光伏控温。通空气时微通道内形成隔热层,减少相变材料中热能的散失。且可根据实际用能需求再次通水,通过低温水对流换热提取相变材料中储存的热能。该方案实现了系统日间高效热电联产、夜间热能长时保温与跨时段按需取用的一体化功能,能够有效解决微通道型PV/T散热能力强但热效率不足,以及相变材料型PV/T储热能力高但换热速率缓慢的固有矛盾。在此基础上,实验测量并分析了不同太阳辐照度、工质流量及相变材料装载质量对系统运行性能的作用规律,深入探究了温控-蓄热一体化PV/T系统中平均电效率、平均热效率、整体能效以及热能存储时效的调控机制。本研究旨在为全天候太阳能综合利用提供新的技术途径与实验依据。

1 实验系统设计

1.1 耦合微通道-相变材料的新型太阳能PV/T系统设计

本研究提出的PV+MICRO+PCM耦合系统主要由太阳能光伏电池板、多层微通道模块、PCM层及隔热层组成,系统结构如图1所示。实验中选用的光伏电池板尺寸为120 mm×85 mm×1.5 mm,额定电压为5.5 V,额定功率为1.5 W。微通道由紫铜夹层片(厚1 mm)与密封垫片(厚1 mm)交替堆叠压紧制得,整体安装于带有进、出口水流道的亚克力底座之上,且各接缝处采用耐高温防水胶进行密封。PCM层选用前期研究中研制的生物质基定形相变储热材料^[25]。该材料以质量分数40%小麦秸秆生物质炭与10%膨胀石墨为载体,引入50%月桂酸相变介质,并采用熔融浸渍法制备得到,实验测量发现,该材料的热导率达到3.08 W/(m·K),相变潜热可以达到105.32 J/g。并且其表现出极佳的热稳定性和循环稳定性,在100次循环测试前后无任何相变介质泄漏现象。该复合相变材料的热物理特性参数列于表1。

1.2 实验平台及运行设置

为验证PV+MICRO+PCM耦合系统的可行性和有效性,本研究搭建了太阳能光伏/热系统综合性能测试平台,如图2所示。测试平台主要包括

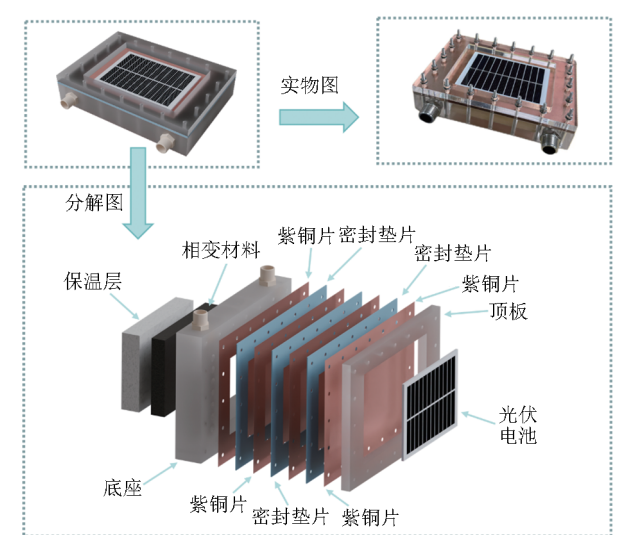


图1 结合微通道和相变材料的太阳能光伏/热系统结构示意图

Fig. 1 Geometric configuration of solar PV/T system integrated with microchannels and PCM

表1 相变材料的热物理特性		
Table 1 Thermophysical properties of PCM		
属性	数值	单位
熔融温度	42	℃
相变潜热	105.32	J/g
热导率	3.08	W/(m·K)
密度	1260	kg/m ³
比热容	1.66	J/(g·℃)

AAA级太阳能模拟光源、I/V性能测试仪、齿轮泵、流量计、数据采集系统及电源控制器等，相关仪器参数列于表2。

实验分别模拟了系统在日间与夜间的运行工况。日间性能测试中，微通道内以去离子水作为传热工质。水流首先经体积流量计测量后进入微通道试验段，待流量监测稳定，开启太阳能模拟器为光伏组件提供稳定的辐照强度。测试时可以通过改变齿轮泵转速，精准调控工质流量。为了监测系统内

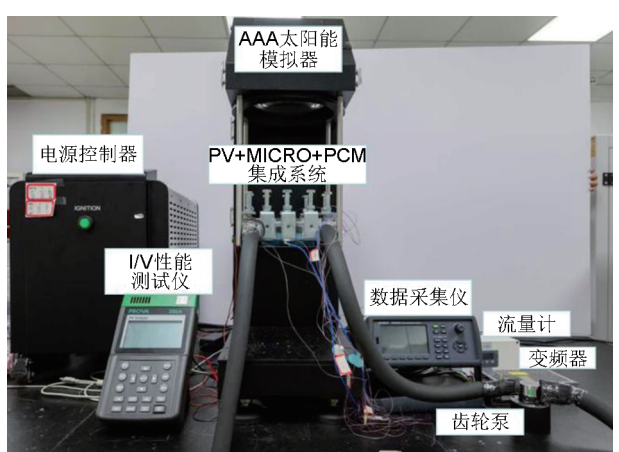


图2 太阳能光伏/热系统综合性能测试平台

Fig. 2 Comprehensive performance test platform for solar PV/T systems

温度分布和热流密度，在流体进出口、光伏电池底面、微通道上表面及相变材料上下表面分别预置两个独立的T型热电偶，且微通道上下表面安装热流传感器。光伏组件的光电转换性能则利用I/V测试仪进行同步测量。而在夜间运行性能测试中，微通道内切换空气作为工质，并关闭太阳光模拟器及I/V测试仪，重点考察PCM储热单元在无光照条件下的保温性能。当存在用热需求时，可将微通道内工质重新切换为去离子水，通过低温水的对流换热提取相变材料中储存的热能，加热后的热水回流至缓冲水箱供使用，实现储热的按需利用。本系统基于工质切换与阀门调控，实现了“日间吸热储热、夜间保温待取、夜间按需取热”的三阶段闭环运行，具体模式如图3所示。值得注意的是，所有测试过程均在环境温度和湿度恒定下进行，最大限度降低外部环境波动对实验结果的影响。为了对比评估PV+MICRO+PCM耦合系统运行性能，本研究还针对常规光伏系统和光伏-相变材料复合系统展开了实验测量，如图4所示。

表2 主要设备及其性能参数				
Table 2 Main equipment and performance parameters				
仪器	型号	作用	测量范围	不确定度/%
热电偶	T型	测量温度	-200~260℃	±0.5
热流传感器	CHFS-20-T-H-85	测量热流	0~6000 W/m ²	±3
I/V性能测试仪	PROVA-200A	测量电流	0~12 A	±1
		测量电压	0~60 V	±1
AAA太阳光模拟器	CEL-AAAS100	模拟太阳光源	0~2000 W/m ²	±0.15
体积流量计	JDL5105	水流流量	0~700 mL/min	±2

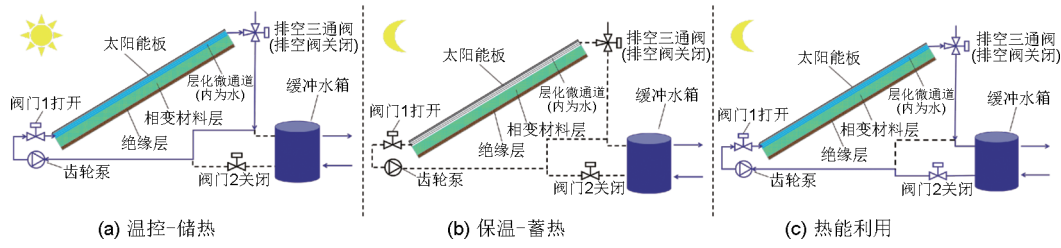


图3 PV+MICRO+PCM系统三阶段运行模式示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the three-stage operation modes of the PV+MICRO+PCM system

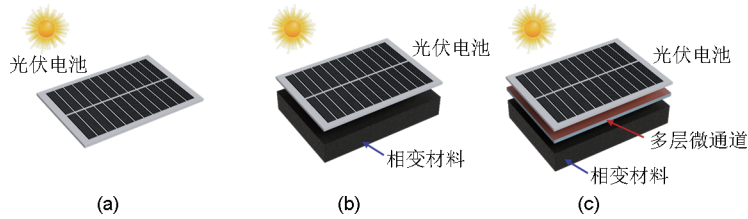


图4 对比实验示意图: (a) 常规PV系统, (b) PV+PCM系统, (c) PV+MICRO+PCM耦合系统

Fig. 4 Schematic diagram of comparative experiments: (a) PV system, (b) PV+PCM system and (c) PV+MICRO+PCM system

1.3 实验不确定度分析

在评估实验结果的可靠性时, 测量误差的影响不可忽视。本研究采用高斯误差传播定律对太阳能光伏/热系统综合性能测试平台的不确定度进行量化分析。由于待评估的性能参数 R 是每个独立测量变量 $X_1, X_2, X_3 \dots X_n$ 的函数, 且每个变量均存在对应测量不确定度 $W_1, W_2, W_3 \dots W_n$, 因此系统整体不确定度 W_R 可由式(1)计算得出^[26]:

$$W_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial X_1} W_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_2} W_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial X_3} W_3 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial X_n} W_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

在本研究中, 温度测量的不确定度为0.5%, 热流密度测量的不确定度为3%, 电流测量的不确定度为1%, 电压测量的不确定度为1%, 模拟太阳光源强度不确定度为0.15%, 工质流量测量的不确定度为2%。由式(1)计算可知, 本试验台的最大综合不确定度为3.9%。

1.4 系统性能分析

1.4.1 平均电效率、平均热效率和整体效率

在太阳能PV/T系统中, 平均电效率 η_{elc} 定义为系统产生的总电能与同期入射总太阳辐射能量之比^[27]:

$$\eta_{\text{elc}} = \frac{E_{\text{elc}}}{A_{\text{pv}} H} \quad (2)$$

式中, A_{pv} 是光伏组件的有效面积, E_{elc} 是有效

发电时段内的累积值, H 是入射到光伏组件表面的太阳总辐射能量, 分别由式(3)和(4)给出:

$$E_{\text{elc}} = \int_{t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} P_{\text{max}}(t) dt \quad (3)$$

$$H = \int_{t_{\text{begin}}}^{t_{\text{end}}} G(t) dt \quad (4)$$

式中, P_{max} 是光伏组件最大输出功率, G 是太阳辐照度, t 是实验测量时间, 下标begin和end分别表示实验开始和测量结束的时刻。

系统最大输出功率 P_{max} 可以根据式(5)计算^[28]。

$$P_{\text{max}} = I \times V \quad (5)$$

式中, I 和 V 分别是最大功率点对应的电流和电压, 由I/V性能测试仪实验测量得到。

太阳能PV/T系统的平均热效率 η_{th} 定义为系统获取的有效热量与作用在光伏组件表面的总太阳辐射能之比, 如式(6)所示^[29]。

$$\eta_{\text{th}} = \frac{Q_{\text{th}}}{A_{\text{pv}} H} \quad (6)$$

式中, Q_{th} 表示系统的有效储热量, 主要由PCM单元存储的热量 Q_{pcm} 与循环水中存储的热量 Q_{water} 两部分组成, 如式(7)所示。

$$Q_{\text{th}} = Q_{\text{pcm}} + Q_{\text{water}} \quad (7)$$

其中, Q_{pcm} 涵盖了相变材料升温过程中的显热储热及相变过程中的潜热储热, 可以由式(8)计算得到:

$$Q_{\text{pcm}} = m_{\text{pcm}} \cdot c_{p,s} (T_{\text{onset}} - T_{\text{initial}}) + m_{\text{pcm}} \cdot \Delta H + m_{\text{pcm}} \cdot c_{p,l} (T_{\text{final}} - T_{\text{offset}}) \quad (8)$$

式中, m_{pcm} 表示相变材料的质量, $c_{p,s}$ 和 $c_{p,l}$ 分别表示 PCM 处于固态和液态时的定压比热容, T_{onset} 和 T_{offset} 表示 PCM 开始熔化和完全熔化时的温度, T_{initial} 表示 PCM 初始时刻的温度, T_{final} 表示 PCM 的最终温度, ΔH 是 PCM 的有效相变潜热。

微通道内循环水存储的热量 Q_{water} 可以通过式(9)计算:

$$Q_{\text{water}} = m_{\text{water}} \cdot c_{p,\text{water}} (T_{\text{end}} - T_{\text{in}}) \quad (9)$$

式中, m_{water} 是水的总质量, $c_{p,\text{water}}$ 是水的比热容, T_{in} 和 T_{end} 是循环水初始温度和测量结束温度。

综上所述, 系统的整体效率 η 可以通过式(10)计算^[30]:

$$\eta = \eta_{\text{in}} + \frac{\eta_{\text{elc}}}{\psi} \quad (10)$$

式中, ψ 是电能与热能的转换系数, 本研究取为 0.38^[31]。

1.4.2 多层微通道的热阻

为定量评估多层微通道结构对系统内热耦合及热传递过程的影响, 本研究进一步分析了微通道的等效热阻。如图 5 所示, 通过简化 PV+MICRO+PCM 系统的物理结构, 微通道热阻 R 可以利用流经微通道上下的热流密度及其相应节点的特征温度计算得出:

$$R = R_1 + R_2 \quad (11)$$

$$R_1 = \frac{T_{\text{micro, up}} - T_{\text{water}}}{\dot{q}_1} \quad (12)$$

$$R_2 = \frac{T_{\text{water}} - T_{\text{micro, under}}}{\dot{q}_2} \quad (13)$$

式中, $T_{\text{micro, up}}$ 是微通道上表面的温度, T_{water} 是微通道内进出口平均水温, $T_{\text{micro, under}}$ 是微通道下表面的温度, $\dot{q}_1$ 和 $\dot{q}_2$ 分别是微通道上、下表面的热流密度。实验中 $\dot{q}_1$ 由热流传感器测量得到, $\dot{q}_2$ 可根据能量平衡原理由式(14)计算:

$$\dot{q}_1 = \dot{q}_2 + \dot{m}_{\text{water}} \cdot c_{p,\text{water}} (T_{\text{end}} - T_{\text{in}}) \quad (14)$$

式中, $\dot{m}_{\text{water}}$ 是水的质量流量, g/s。

2 结果与讨论

2.1 温控蓄热一体式 PV+MICRO+PCM 耦合系统的性能评估

为评估 PV+MICRO+PCM 耦合系统的综合性能, 本研究分别构建了 PV 系统与传统 PV+PCM 系统作为参照组, 并对其性能展开实验对比分析。实验中, 环境温度恒定保持在 30℃, 相变材料质量、

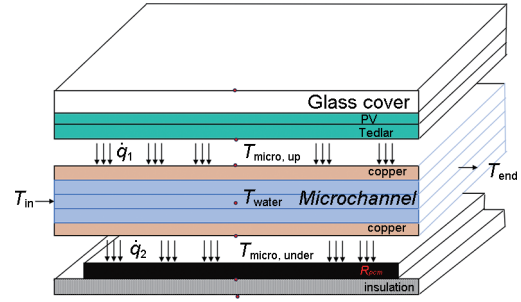


图5 PV+MICRO+PCM系统物理模型示意图
Fig. 5 Schematic diagram of the physical model for the PV-Microchannel-PCM system

工质流量及太阳辐照度分别设为 115 g、300 mL/min 和 1000 W/m²。图 6(a)和(b)展示了三种系统构型光伏电池与相变材料的温度变化规律。实验结果表明, 常规 PV 系统中的电池温度随时间迅速升高, 并在运行约 50 min 后趋于稳定, 温度高达 71.5℃。对于传统 PV+PCM 系统, 电池与相变材料温度同步上升, 并在 20~40 min 区间内出现明显的平台期, 这主要源于相变材料在熔化过程中通过吸收大量潜热快速消纳光伏废热, 同时利用其近似恒温的特性, 有效抑制了电池的温升。然而, 随着运行时间的进一步延长, 相变材料完全熔化, 电池温度继续升高并最终达到约 66.6℃。相比之下, PV+MICRO+PCM 耦合系统呈现出更平稳的温度波动曲线, 光伏废热被传递至微通道内水及相变材料层, 使得电池最高工作温度始终控制在 55.3℃ 以内, 表现出最优的控温效果, 同时实现了热量的收集而非直接散失。这得益于微通道内均匀的水流分布, 由于相变材料的作用, 微通道内进出口水温小于 0.1℃, 使得沿流道方向的温度场更加均匀, 有效避免了局部热量积聚。

图 6(c)分别展示了三种系统稳态运行时的平均电效率与平均热效率。其中 PV+MICRO+PCM 系统的平均电效率达 12.8%, 相较于常规 PV 系统和 PV+PCM 系统, 分别提升约 15.3% 和 7.6%。这得益于微通道和相变材料的共同作用, 有效抑制了电池温升, 维持了电池的高效工作状态。在储热性能方面, 传统 PV+PCM 系统平均热效率仅为 15.0%, 而引入微通道显著增强了系统对光伏废热的消纳能力, 耦合系统的平均热效率大幅提升至 24.7%。同时, 系统整体效率达 58.3%, 较纯 PV 系统和 PV+PCM 系统分别相对提升约 99.7% 和 26.2%。此外, 在系统达到热平衡后, 进一步测试了太阳能电池的

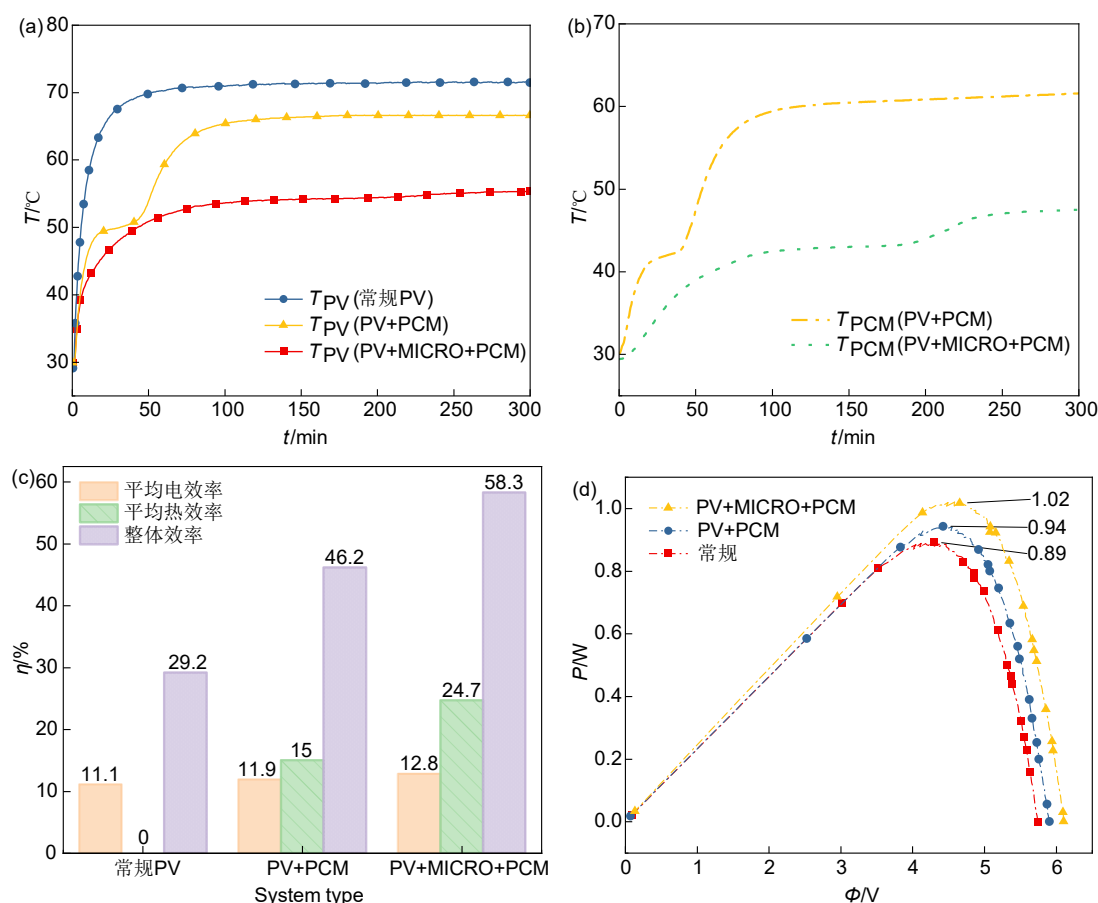


图6 不同系统的 (a) PV温度、(b) PCM温度、(c) 平均电效率和平均热效率以及 (d) 光伏组件P-V特性曲线
Fig. 6 (a) PV temperature, (b) PCM temperature, (c) electrical efficiency and thermal efficiency, (d) P-V characteristic curves of photovoltaic modules for different systems

P-V特性曲线,如图6(d)所示。实验结果表明,稳定后的PV系统和PV-PCM系统的最大输出功率分别为0.89 W和0.94 W。PV+MICRO+PCM耦合系统由于更有效地抑制了光伏电池的温升,展现出最优的电输出特性,其最大输出功率提升至1.02 W,较前两者分别提高了14.6%和8.5%。

2.2 辐照度对系统性能的影响规律

太阳辐照度是决定光伏组件电效率和储热单元热效率的最重要外部因素。为探究辐照度对PV+MICRO+PCM耦合系统性能的影响,本研究在固定相变材料用量115 g、工质流速300 mL/min的实验条件下,选取800 W/m²、1000 W/m²、1200 W/m²及1400 W/m²四种辐照度,对系统能源转换性能展开实验对比分析。图7(a)和(b)分别展示了不同辐照度下光伏电池与相变材料的温度变化规律。实验结果表明,光伏电池的稳态温度随辐照度升高呈递增趋势,在800 W/m²、1000 W/m²、1200 W/m²和

1400 W/m²辐照度下分别约为52.4 $^{\circ}\text{C}$ 、55.3 $^{\circ}\text{C}$ 、57.1 $^{\circ}\text{C}$ 和59.4 $^{\circ}\text{C}$ 。相应地,相变材料的温度也随辐照度增高而同步上升。当辐照度从800 W/m²增至1400 W/m²时,相变材料的稳态工作温度提高了7.0 $^{\circ}\text{C}$ 。值得注意的是,在800 W/m²较低辐照工况下,相变材料并未完全熔化。此外,高辐照度也显著加快了相变材料的相变过程。如图7(b)所示,当辐照度从1000 W/m²增到1400 W/m²时,PCM层完成固-液相变的时间由约120 min缩减至80 min。

图7(c)为不同辐照度下PV+MICRO+PCM耦合系统的效率对比图。当辐照度从1000 W/m²增至1400 W/m²时,平均电效率从12.8%降至11.2%,平均热效率从24.7%降至19.9%。整体效率从58.3%降至49.3%,可以发现,在高辐照工况下系统仍能维持较高的整体效率。图7(d)进一步给出了各工况下太阳能电池的P-V特性曲线。实验结果表明,随着辐照度增加,系统稳定后最大功率点功率

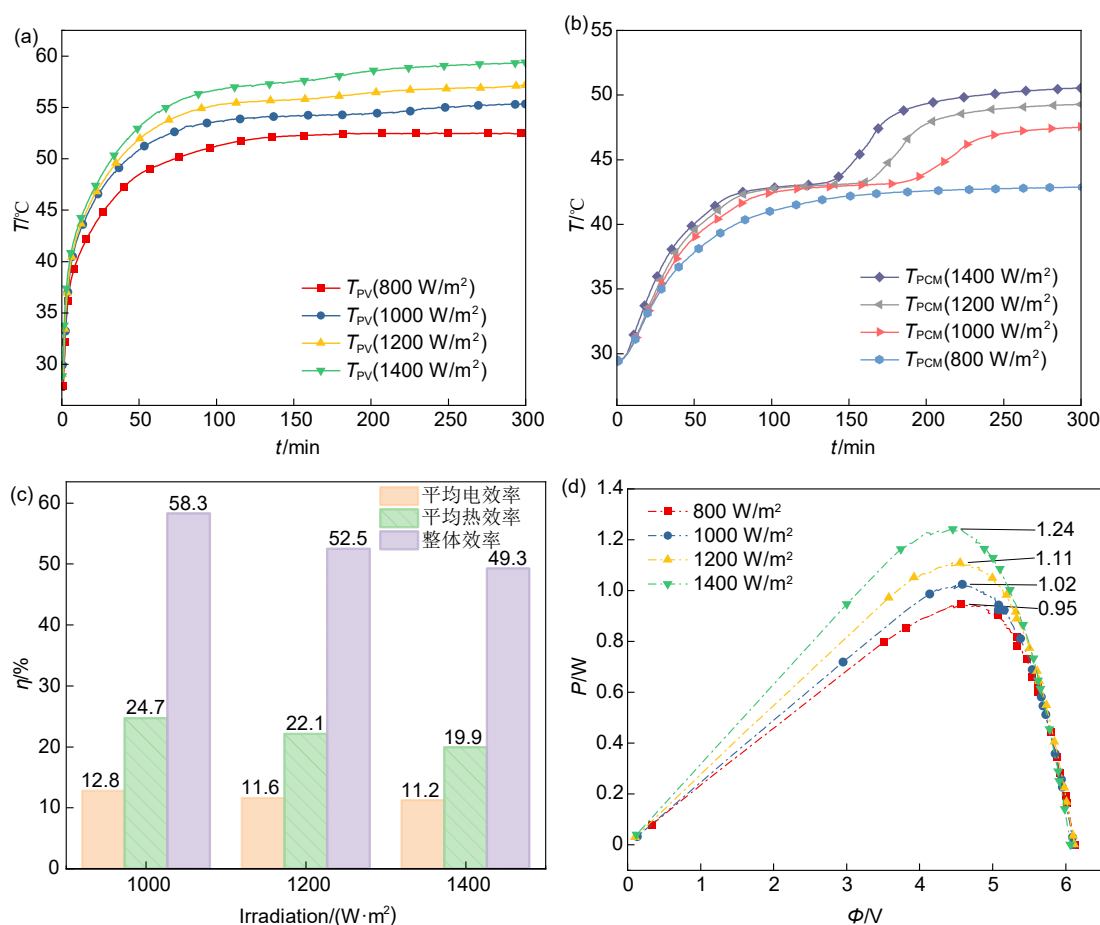


图7 不同辐照度下系统的 (a) PV 温度、(b) PCM 温度、(c) 平均电效率和平均热效率以及 (d) 光伏 P - V 特性曲线
Fig. 7 (a) PV temperature, (b) PCM temperature, (c) electrical and thermal efficiency, (d) photovoltaic P - V characteristic curves of the system under different irradiance levels

提高。相较于 1200 W/m^2 、1000 W/m^2 、800 W/m^2 工况，1400 W/m^2 辐照对应的最大功率分别提升了 12%、18% 和 31%。这一增长主要归因于辐照度提升带来的光生电流大幅增加，且得益于微通道与相变材料的协同作用，有效缓解了光伏电池温升引起的光电转换性能损失，从而实现了输出功率的提升。

2.3 流量对系统性能的影响规律

为探究工质流量对 PV+MICRO+PCM 耦合系统性能的影响，本研究在固定相变材料用量 115 g、太阳辐照度 1000 W/m^2 的实验条件下，选取 100、200、300 mL/min 三种工质流量进行对比实验。图 8 (a) 和图 8 (b) 展示了不同流量下的光伏电池与相变材料的温度变化规律。实验结果表明，100 mL/min 流量工况下，光伏电池稳态温度最高，约为 57.8 $^{\circ}\text{C}$ ，且相变材料在实验周期内未能充分熔化。当流量增

至 200 mL/min 时，电池稳态温度降至 56.6 $^{\circ}\text{C}$ ，相变材料完全熔化所需时间约为 350 min。进一步将工质流量提高到 300 mL/min ，可以发现电池稳态温度降低至 55.3 $^{\circ}\text{C}$ ，并且相变材料在 180 min 时已充分熔化。

图 8(c) 对比了不同工质流量下 PV+MICRO+PCM 耦合系统的平均电效率与平均热效率。实验结果表明，在 100 mL/min 的流量工况下，系统平均电效率与平均热效率分别为 11.7% 和 15.7%，整体效率为 46.5%。而随着工质流量的增加，系统电效率和热效率均随之提升。为进一步评估流量对光伏组件电性能的影响，图 8(d) 展示了系统达稳态后的 P - V 输出特性。如图所示，系统最大功率点功率与工质流量呈正相关。在 300 mL/min 的高流量工况下，由于微通道高效换热抑制了光伏电池温度升高，系统的最大输出功率提高到 1.02 W，与 100 mL/min

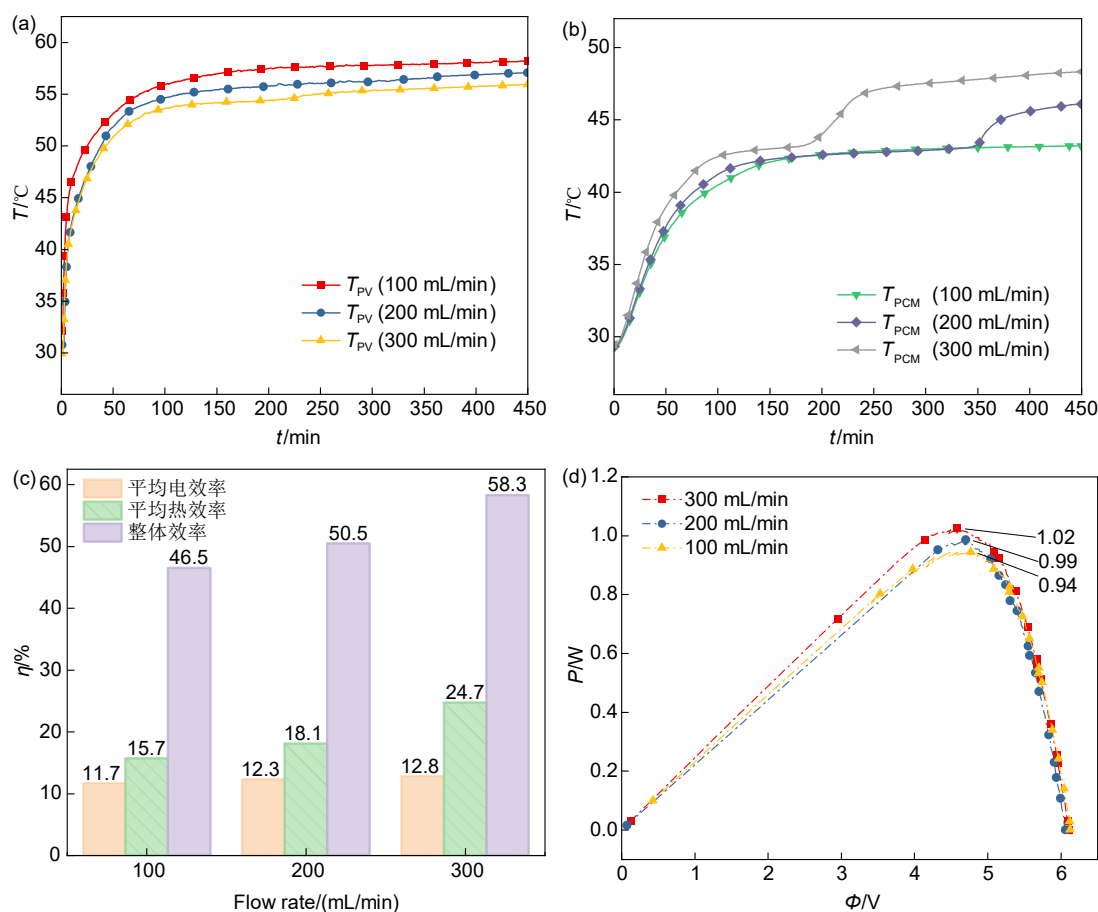


图8 不同流量下系统的 (a) PV 温度、(b) PCM 温度、(c) 平均电效率和平均热效率、(d) P - V 特性曲线

Fig. 8 (a) PV temperature, (b) PCM temperature, (c) electrical and thermal efficiency, (d) P - V characteristic curves of the system under different flow rates

和 200 mL/min 工况相比, 功率增益分别达 9% 和 3%。

2.4 相变材料质量对系统性能的影响规律

为探究相变材料质量对 PV+MICRO+PCM 耦合系统性能的影响, 本研究在固定太阳辐照度为 1000 W/m^2 、工质流量为 300 mL/min 的条件下, 对加载不同质量相变材料的系统进行了性能对比测试。图 9(a) 和图 9(b) 展示了不同相变材料质量下光伏电池与相变材料层的温度变化曲线。实验结果表明, 对于 75 g 的相变材料层, 材料的温度响应较快且储热容量有限, 削弱了对光伏电池温升的缓冲作用, 导致电池最终呈现出最高的稳态温度。当相变材料质量增加至 95 g 和 115 g 时, 系统的温控性能和储热能力得到提升, 相变材料温度波动曲线趋于平缓, 此时电池稳态温度分别降至 56.7°C 和 55.3°C 。

图 9(c) 展示了不同相变材料质量下 PV+MICRO+PCM 耦合系统的平均电效率、平均热效

率和整体效率。在 75 g 相变材料质量下, 系统的平均电效率和平均热效率分别为 12.3% 和 20.6%。而随着相变材料增加, 光伏平均电效率和系统平均热效率略微提升。同时, 115 g 相变材料质量对应的系统综合效率为 58.3%, 相较于 75 g 和 95 g 相变材料质量条件, 分别提升约 10.2% 和 5.6%。此外, 图 9(d) 展示了太阳能电池的 P - V 特性曲线。由图可知, 随着相变材料负载质量的提高, 光伏组件的最大功率点功率升高。这表明增加相变材料的储热容量不仅能强化废热回收, 还能通过抑制温升有效降低电池的功率损失。

2.5 温控蓄热一体式 PV+MICRO+PCM 耦合系统的夜间保温性能评估

为探究系统构型对保温性能的影响, 本研究对比了传统 PV+PCM 系统与 PV+MICRO+PCM 耦合系统在夜间蓄热量的耗散速率。实验首先将系统置于 1000 W/m^2 太阳辐照下运行 6 小时, 随后关闭太

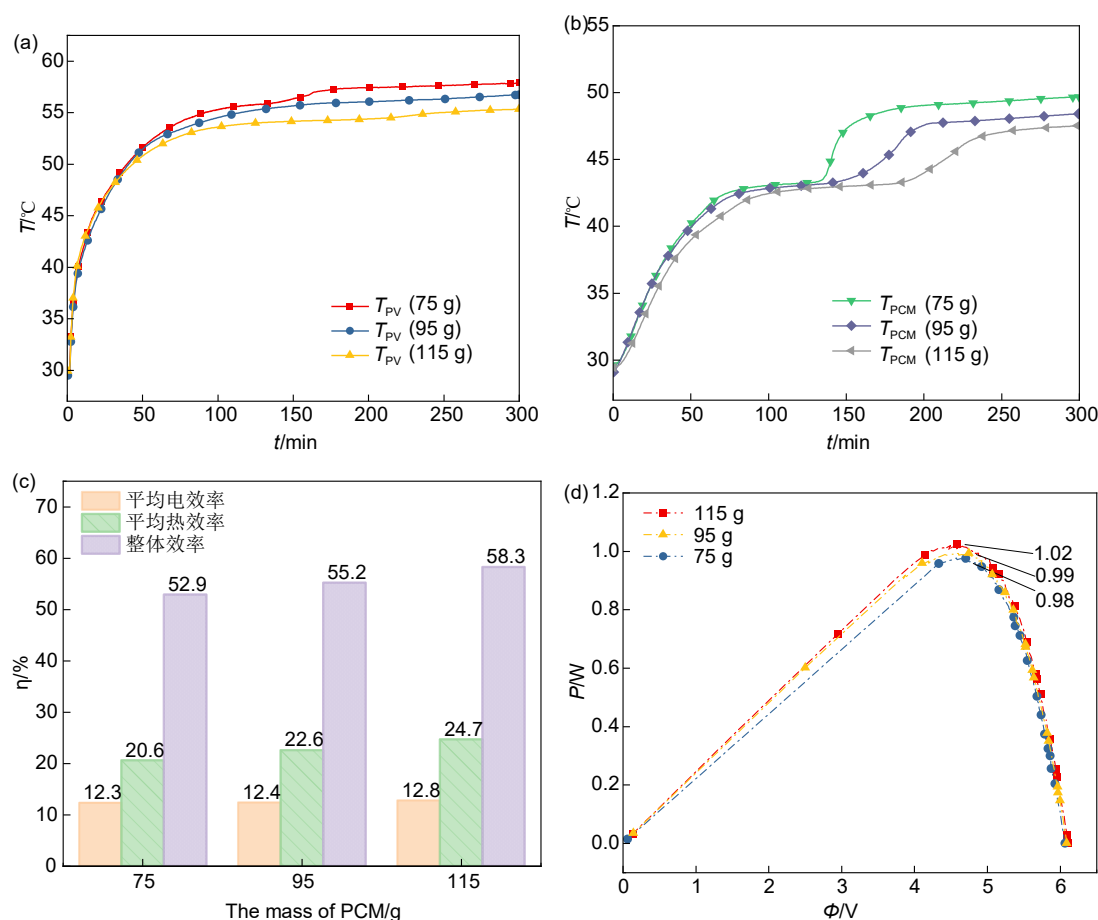


图9 负载不同PCM质量的系统中 (a) PV温度、(b) PCM温度、(c) 平均电效率和平均热效率以及 (d) 光伏 P - V 特性曲线
Fig. 9 (a) PV temperature, (b) PCM temperature, (c) electrical and thermal efficiency, (d) P - V characteristic curves of the system with different PCM masses

太阳能模拟器进入预设的无辐照夜间工况,通过切换工质为空气并彻底排空微通道内的残留水分,使微通道层转化为静止空气隔热层。与此同时,实验监测了系统内部相变材料在自然环境下的温度衰减过程。图 10(a)展示了PV+PCM和PV+MICRO+PCM系统中相变材料的温度变化曲线。实验结果表明,两种系统的相变材料温度均呈现出先快后慢的非线性下降趋势。其中,PV+PCM系统因缺乏有效的保温措施,相变材料温度衰减速率较快,表现出有限的保温时效。相比之下,PV+MICRO+PCM系统的温度变化更为平缓,具有更优的持续保温能力。在此基础上,本研究以温度降至35°C作为评价标准,对比了不同系统的保温性能。结果显示,PV+MICRO+PCM系统的保温时间为154 min,较PV+PCM系统延长了76 min。这一差异主要源于PV+MICRO+PCM耦合系统采用了多层微通道结构设计。由于通道特征尺寸的限制,空气自然对流被显

著抑制,热量传递转而由低导热系数静止空气的热传导为主,极大程度减少了相变材料储存的热量向周围环境散失。而PV+PCM系统中相变材料与光伏组件直接接触,导致夜间散热损失更大。

为更好分析多层微通道结构的温控性能,本研究计算了耦合系统中微通道的等效热阻,结果如图 10(b)所示。研究表明,与传统PV+PCM系统对比,微通道结构的引入赋予了系统动态调控热量运输的能力。在日间工作模式下,微通道内充盈循环水,等效热阻仅为1.08 K/W,确保光伏电池累积的热量能够被传导至相变材料层进行存储。而在夜间,通过工质切换使流道内充盈静止空气,等效热阻大幅跃升至5.16 K/W。这种基于工质调控的热阻特性定向变化,极大增强了微通道的隔热保温性能,有效抑制了相变材料储存热量的耗散。

2.6 相变材料质量对夜间保温性能的影响

本研究考察了不同相变材料负载量对PV+

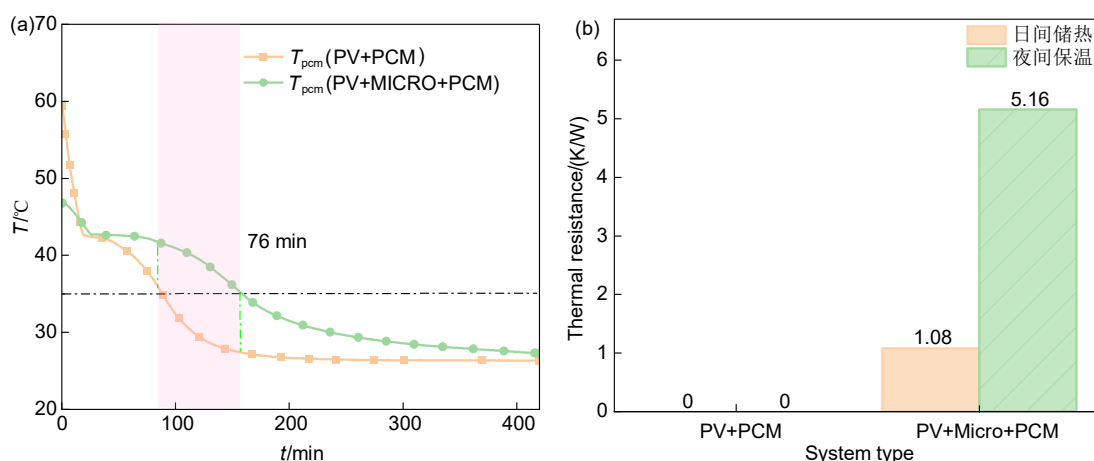


图 10 (a) 无辐照时不同系统的 PCM 温度变化曲线; (b) 不同系统日间夜间热阻对比

Fig. 10 (a) Variation curves of PCM temperature for different systems without irradiation; (b) comparison of thermal resistance of different system structures during daytime and nighttime

MICRO+PCM 耦合系统夜间保温性能的影响, 结果如图 11 所示。实验在恒定环境温度下进行, 以相变材料温度降至 35°C 的跨度作为保温时间的评价指标。可以发现, 相变材料负载越少, 系统保温持续时间越短。当相变材料负载量从 75 g 增至 95 g 和 115 g 时, 保温时间分别由 98 min 延长至 136 min 和 154 min。由此可见, 提高相变材料负载量能显著增强系统的热管理冗余和储热总量, 延长热能的有效利用时段。

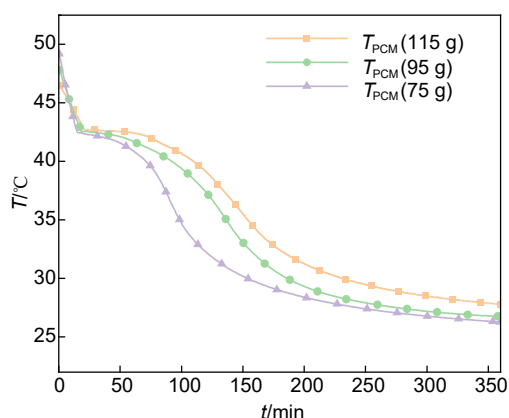


图 11 三种 PCM 质量下的夜间温度曲线

Fig. 11 Nighttime temperature curves under three PCM mass conditions

3 结 论

本研究提出并构建了一种耦合多层微通道与定形复合相变材料的新型太阳能综合利用系统, 通过搭建实验测试平台, 对比分析了新型耦合系统的日

间太阳能利用效率与夜间保温性能, 并深入探究了太阳辐照度、工质流量、相变材料质量等因素对系统综合性能的调控规律, 主要结论归纳如下。

(1) 在日间运行条件下, 通过引入多层微通道和定形复合相变材料, $\text{PV}+\text{MICRO}+\text{PCM}$ 耦合系统可以将光伏板工作温度从 71.5°C 有效降低至 55.3°C 以下。系统稳态平均电效率达到 12.8%, 较常规 PV 系统相对提升了 15.3%。同时, 系统平均热效率高达 24.7%, 较传统基于相变材料的 PV/T 系统提升约 64.7%。

(2) $\text{PV}+\text{MICRO}+\text{PCM}$ 耦合系统的综合性能受运行工况及设计参数的共同调控。当太阳辐照度从 800 W/m^2 增至 1400 W/m^2 时, 光伏电池温度升高 7°C , 系统平均电效率下降 14.3%, 平均热效率下降 24.1%, 但系统仍然维持 49.3% 的整体效率, 且光伏组件最大输出功率增加 31%。同时, 增加微通道内工质流量和相变材料负载质量, 可有效降低电池温度, 提升系统整体效率以及最大输出功率。

(3) 在夜间运行工况下, $\text{PV}+\text{MICRO}+\text{PCM}$ 耦合系统表现出优异的保温性能, 其保温时间达 154 min, 较传统 PV-PCM 系统显著延长了 76 min。此外, 当相变材料载量从 115 g 调减至 75 g 时, 系统保温时间减少了 56 min。

参 考 文 献

- [1] GE T S, WANG R Z, XU Z Y, et al. Solar heating and cooling: Present and future development[J]. Renewable Energy, 2018, 126: 1126-1140. DOI:10.1016/j.renene.2017.06.081.

- [2] LI S T, GONG X M, LIN W Y, et al. Review of transpired solar collectors: Heat and mass transfer mechanisms and enhancement, system integration, and performance assessment and optimisation [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 450: 141967. DOI:10.1016/j.jclepro.2024.141967.
- [3] LIN W Y, MA Z J, LI K H, et al. A dynamic simulation platform for fault modelling and characterisation of building integrated photovoltaics[J]. *Renewable Energy*, 2021, 179: 963-981. DOI: 10.1016/j.renene.2021.07.035.
- [4] VINOD, KUMAR R, SINGH S K. Solar photovoltaic modeling and simulation: As a renewable energy solution[J]. *Energy Reports*, 2018, 4: 701-712. DOI:10.1016/j.egy.2018.09.008.
- [5] LI R, ZHAI P P, LI J P, et al. Performance analysis of micro heat pipe PV/T within and outside the greenhouse in northwest China [J]. *Energy*, 2024, 302: 131834. DOI:10.1016/j.energy.2024.131834.
- [6] MAKKI A, OMER S, SABIR H. Advancements in hybrid photovoltaic systems for enhanced solar cells performance[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 41: 658-684. DOI:10.1016/j.rser.2014.08.069.
- [7] LI R Y, SHI Y, WU M C, et al. Photovoltaic panel cooling by atmospheric water sorption-evaporation cycle[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(8): 636-643. DOI:10.1038/s41893-020-0535-4.
- [8] BRAHIM T, JEMNI A. Economical assessment and applications of photovoltaic/thermal hybrid solar technology: A review[J]. *Solar Energy*, 2017, 153: 540-561. DOI:10.1016/j.solener.2017.05.081.
- [9] JIA Y T, ALVA G, FANG G Y. Development and applications of photovoltaic-thermal systems: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019, 102: 249-265. DOI:10.1016/j.rser.2018.12.030.
- [10] XU H T, WANG N, ZHANG C Y, et al. Energy conversion performance of a PV/T-PCM system under different thermal regulation strategies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 229: 113660. DOI:10.1016/j.enconman.2020.113660.
- [11] FU H D, ZHAO X X, MA L, et al. A comparative study on three types of solar utilization technologies for buildings: Photovoltaic, solar thermal and hybrid photovoltaic/thermal systems[J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 140: 1-13. DOI: 10.1016/j.enconman.2017.02.059.
- [12] YING S, ZHANG X L, WU Y C, et al. Solar photovoltaic/thermal (PV/T) systems with/without phase change materials (PCMs): A review[J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 89: 111582. DOI: 10.1016/j.est.2024.111582.
- [13] OLMUŞ U, GÜZELEL Y E, BÜYÜKALACA O. Comparative numerical investigation of different PVT collector configurations: Energy and exergy analysis[J]. *Energy*, 2025, 316: 134500. DOI: 10.1016/j.energy.2025.134500.
- [14] ALSAGRI A S, ALROBAIAN A A. Analysis and performance prediction of a building integrated photovoltaic thermal system with and without phase change material[J]. *Energy*, 2024, 310: 133249. DOI:10.1016/j.energy.2024.133249.
- [15] KARTHICK A, KALIDASA MURUGAVEL K, GHOSH A, et al. Investigation of a binary eutectic mixture of phase change material for building integrated photovoltaic (BIPV) system[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2020, 207: 110360. DOI: 10.1016/j.solmat.2019.110360.
- [16] HUANG M J. The effect of using two PCMs on the thermal regulation performance of BIPV systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, 95(3): 957-963. DOI:10.1016/j.solmat.2010.11.032.
- [17] MALVI C S, DIXON-HARDY D W, CROOK R. Energy balance model of combined photovoltaic solar-thermal system incorporating phase change material[J]. *Solar Energy*, 2011, 85 (7): 1440-1446. DOI:10.1016/j.solener.2011.03.027.
- [18] LUO Z Y, ZHU N, HU P F, et al. Simulation study on performance of PV-PCM-TE system for year-round analysis[J]. *Renewable Energy*, 2022, 195: 263-273. DOI:10.1016/j.renene.2022.06.032.
- [19] MIRZA C R, ALSHARIFI T, MAHDI J M, et al. Efficient thermal management of PVT systems via water-PCM hybridization: New design with optimized geometrical configuration[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2025, 280: 128431. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2025.128431.
- [20] FIORENTINI M, COOPER P, MA Z J. Development and optimization of an innovative HVAC system with integrated PVT and PCM thermal storage for a net-zero energy retrofitted house [J]. *Energy and Buildings*, 2015, 94: 21-32. DOI: 10.1016/j.enbuild.2015.02.018.
- [21] SENTHIL KUMAR K, REVANTH S, SANJEEV D, et al. Experimental investigation of improving the energy conversion efficiency of PV cell by integrating with PCM[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 37: 712-716. DOI:10.1016/j.matpr.2020.05.723.
- [22] MODJINO M, JI J, YUAN W Q, et al. Performance comparison of encapsulated PCM PV/T, microchannel heat pipe PV/T and conventional PV/T systems[J]. *Energy*, 2019, 166: 1249-1266. DOI:10.1016/j.energy.2018.10.007.
- [23] HOSSEINZADEH M, SARDARABADI M, PASSANDIDEH-FARD M. Energy and exergy analysis of nanofluid based photovoltaic thermal system integrated with phase change material[J]. *Energy*, 2018, 147: 636-647. DOI:10.1016/j.energy.2018.01.073.
- [24] FU Z G, LIANG X T, LI Y, et al. Performance improvement of a PVT system using a multilayer structural heat exchanger with PCMs[J]. *Renewable Energy*, 2021, 169: 308-317. DOI:10.1016/j.renene.2020.12.108.
- [25] LIU P, TAN Z H, CUI X L, et al. Comparative study of different typical organic form-stable phase change materials packaged by carbonized wheat straw-expanded graphite binary supporting material[J]. *Journal of Energy Storage*, 2025, 108: 115088. DOI: 10.1016/j.est.2024.115088.
- [26] BASSAM A M, SOPIAN K, IBRAHIM A, et al. Experimental analysis of photovoltaic thermal collector (PVT) with nano PCM and micro-fins tube counterclockwise twisted tape nanofluid[J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023, 45: 102883. DOI: 10.1016/j.csite.2023.102883.
- [27] YANG X J, SUN L L, YUAN Y P, et al. Experimental investigation on performance comparison of PV/T-PCM system and PV/T

- system[J]. Renewable Energy, 2018, 119: 152-159. DOI:10.1016/j.renene.2017.11.094.
- [28] YANDRI E. Development and experiment on the performance of polymeric hybrid Photovoltaic Thermal (PVT) collector with halogen solar simulator[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019, 201: 110066. DOI:10.1016/j.solmat.2019.110066.
- [29] DENG Y C, QUAN Z H, ZHAO Y H, et al. Experimental research on the performance of household-type photovoltaic-thermal system based on micro-heat-pipe array in Beijing[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106: 1039-1047. DOI:10.1016/j.enconman.2015.09.067.
- [30] ZHU X L, YU M, ZHOU L C, et al. Performance investigation and parametric analysis of a novel flat copper tube loop-heat-pipe PV/T system[J]. Journal of Building Engineering, 2025, 100: 111820. DOI:10.1016/j.jobe.2025.111820.
- [31] HUANG B J, LIN T H, HUNG W C, et al. Performance evaluation of solar photovoltaic/thermal systems[J]. Solar Energy, 2001, 70 (5): 443-448. DOI:10.1016/S0038-092X(00)00153-5.

广 告 索 引

封二 惠州亿纬锂能股份有限公司

封三 中关村储能产业技术联盟

封四 中储国能(北京)技术有限公司

后插 1 浙江南都电源动力股份有限公司

后插 2 国家电网公司电力科学研究院电池储能技术

实验室

后插 3 厦门宇电自动化科技有限公司

后插 4 鄂尔多斯实验室

后插 5 中科海钠科技有限责任公司

后插 6 上海交通大学中英国际低碳学院